

УДК 621.3.019

Приймачук Е. –ст. гр. ЕТ-21

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ДЕГРАДАЦІЙНІ ПРОЦЕСИ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ: ВІД ТЕРМОГРАФІЇ ДО ПРОГНОЗНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ

Pryimachuk E.

Ternopil Ivan Puluj National Technical University

DEGRADATION PROCESSES IN ELECTRIC POWER SYSTEMS: FROM THERMOGRAPHY TO PREDICTIVE MAINTENANCE

Ключові слова: деградація матеріалу, контроль за старінням, інфрачервона термографія
Keywords: material degradation, aging monitoring, infrared thermography

Електроенергетична інфраструктура функціонує в умовах постійного зростання навантажень, обмежених ресурсів і підвищених ризиків зовнішнього впливу [1]. Сучасні умови експлуатації характеризуються частими перевантаженнями, аварійними режимами, інтенсивними комутаційними процесами та впливом несприятливих кліматичних чинників. Особливою складністю є збільшення кількості комутаційних операцій, зумовлене погодинними графіками відключень, які вводяться через масовані дронів та ракетні удари РФ на енергооб'єкти України. У таких умовах деградація матеріалів — провідників, контактних з'єднань, шин, кабельних ліній та ізоляційних систем — стає однією з ключових причин технологічних порушень і відмов обладнання.

Основними механізмами деградації електротехнічних матеріалів є корозійні процеси, термічне старіння ізоляції та локальні перегріву контактних вузлів. Корозія є одним із найпоширеніших процесів руйнування металевих елементів підстанцій і повітряних ліній електропередачі [2]. Електрохімічна взаємодія металів із вологою, солями та промисловими викидами призводить до утворення оксидних плівок, збільшення перехідного опору контактів і, як наслідок, локального перегрівання. Особливо небезпечними є з'єднання різнорідних металів, наприклад мідно-алюмінієві контакти, де формуються гальванічні пари та прискорюється руйнування одного з матеріалів. Зростання перехідного опору навіть на незначну величину спричиняє суттєве підвищення тепловиділення відповідно до залежності $P = I^2R$, що може призвести до оплавлення контактів та розвитку аварійного процесу.

Термічне старіння ізоляції є домінуючим механізмом деградації кабельних ліній та ізоляційних систем електрообладнання [3]. Для кабелів з ізоляцією типу XLPE (зшитий поліетилен) характерні структурні зміни полімеру під дією підвищеної температури, електричного поля та окислювальних процесів. Відповідно до термоактиваційної моделі старіння, підвищення робочої температури на декілька градусів може суттєво скоротити строк служби ізоляції. У реальних умовах експлуатації, коли обладнання працює з перевантаженням або за нерівномірного розподілу навантаження між фазами, процес старіння прискорюється, а деградація набуває прихованого характеру, що ускладнює її виявлення без спеціалізованих методів контролю.

Ефективна протидія деградації матеріалів неможлива без впровадження сучасних методів діагностики. Одним із найбільш результативних безконтактних

методів є інфрачервона термографія, яка дозволяє виявляти температурні аномалії на ранніх стадіях розвитку дефекту [4]. Тепловізійний контроль забезпечує виявлення перегрівів контактних з'єднань, дисбалансу фазних навантажень, дефектів ізоляції та перевантажень кабельних ліній.

Важливим доповненням до термографії є контроль часткових розрядів, який застосовується для оцінювання стану високовольтної ізоляції кабелів і обладнання [5]. Наявність часткових розрядів свідчить про локальні дефекти структури ізоляції, наявність порожнин або мікротріщин. Аналіз параметрів імпульсів дозволяє оцінити стадію розвитку дефекту та визначити ризик пробою. Додатково використовуються методи вимірювання діелектричних втрат ($\text{tg}\delta$), що відображають зміну властивостей ізоляційного матеріалу внаслідок старіння та зволоження.

Сучасні підходи до управління технічним станом передбачають не лише виявлення дефектів, а й прогнозування залишкового ресурсу елементів [6]. Методи прогнозування поділяються на фізично обґрунтовані моделі та data-driven підходи, що базуються на аналізі часових рядів та алгоритмах машинного навчання. Комбінування цих підходів дозволяє визначити показник RUL (Remaining Useful Life) — залишковий ресурс обладнання.

Інтегрована система моніторингу підстанцій повинна включати стаціонарні тепловізори у критичних точках, датчики струму й температури, модулі контролю часткових розрядів, аналітичний сервер обробки інформації та програмний модуль прогнозування відмов. Практичні заходи запобігання деградації включають застосування корозійностійких матеріалів, біметалевих перехідників, антикорозійних покриттів і мастил, оптимізацію розподілу навантаження між фазами, належну вентиляцію та дренаж підстанцій, а також регулярний автоматизований тепловий аудит.

Комплексне поєднання технічних рішень, діагностичних методів і аналітичних алгоритмів дозволяє істотно підвищити надійність роботи енергетичної інфраструктури, зменшити ризик аварій та забезпечити стабільність електропостачання.

Література

1. Silnyk M., Fedynets V. Electrical centralization devices in railway automation systems. Львів, 2025. (дата звернення: 04.03.2026).
2. Liu Y., Zhou W., Li J. Thermal ageing evaluation of XLPE power cable insulation // *Polymers*. 2022. Vol. 14, No. 4. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14040789>
3. (дата звернення: 05.03.2026).
4. Tao J., Heikkilä J., Lehtonen M. Advancement and challenges: A review of power cable aging monitoring and diagnostics. Aalto University, 2023. (дата звернення: 04.03.2026).
5. Balakrishnan G.K., Sathiyamoorthy K., Ramachandran K. A review of infrared thermography for condition-based monitoring in electrical energy applications and recommendations // *Energies*. 2022. Vol. 15, No. 9. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15093123>
6. (дата звернення: 05.03.2026).
7. FLIR Systems. Thermal imaging cameras for substation monitoring: Application note. 2024. (дата звернення: 05.03.2026).
8. Маркович І.Б., Ковальчук О.М., Бойко Т.Я. Діагностика технічного стану електрообладнання енергетичних систем // *Актуальні задачі сучасних технологій: збірник наукових праць ТНТУ*. 2024. №1. С. 45–52. (дата звернення: 05.03.2026).